

dr hab. inż. Abdrahman Alsabry, prof. UZ^{1*)}

ORCID: 0000-0002-1732-041X

mgr inż. Krzysztof Szymański²⁾

ORCID: 0009-0001-3333-6323

dr inż. Beata Backiel-Brzozowska³⁾

ORCID: 0000-0002-0100-6557

dr inż. Marta Gortych⁴⁾

ORCID: 0000-0001-5177-2287

Impact of the heat transfer coefficient for heating and cooling in multifamily buildings in Poland

Wpływ współczynnika przenikania ciepła na ogrzewanie i chłodzenie budynków wielorodzinnych w Polsce

DOI: 10.15199/33.2025.09.26

Abstract. Improving the energy efficiency of multifamily buildings in Poland is important in view of increasing energy needs and climate change. The heat transfer coefficient of building envelope, which affects energy consumption for heating and cooling, is a key factor. The article analyses the risk of overheating in summer, which becomes more important as temperatures rise. It identifies the need to improve the thermal insulation of buildings to reduce energy consumption and the risk of overheating in summer.

Keywords: Thermal insulation of multi-family buildings; Building compactness; Climatic location; Net present value; Energy demand for heating and cooling

Streszczenie. Poprawa efektywności energetycznej budynków wielorodzinnych w Polsce jest ważna wobec rosnących potrzeb energetycznych i zmian klimatycznych. Kluczowy jest współczynnik przenikania ciepła przegród zewnętrznych, wpływający na zużycie energii na ogrzewanie i chłodzenie. Artykuł analizuje ryzyko przegrzewania pomieszczeń latem, które nabiera znaczenia wraz ze wzrostem temperatur. Wskazano konieczność poprawy termoizolacji budynków, by ograniczyć zużycie energii i ryzyko przegrzewania w okresie letnim.

Słowa kluczowe: izolacyjność cieplna budynków wielorodzinnych; geometria bryły; lokalizacja klimatyczna; Wartość Bieżąca Netto (NPV); zapotrzebowanie na energię do celów ogrzewania i chłodzenia.

From 2030 onwards, all new buildings in the EU should be zero-emission, meaning advanced construction technologies must be employed and the proportion of energy derived from renewable sources must increase [1]. One of the most important factors affecting the energy performance of buildings is the thermal insulation of external walls, optimising which can significantly reduce heat loss and operating costs [2, 3]. Various approaches to selecting the thickness of thermal insulation have been analysed in the literature. Methods based on economic analysis, such as optimisation using net present value (NPV), enable investment costs, energy savings and payback period to be considered [4 – 7]. At the same time, analyses using actual operating data from existing buildings are being conducted to allow the local context and specific use of the building to be taken into account [8]. Another important factor influencing the energy efficiency of buildings is their geometry, which is described by the A/V shape factor. This determines the ratio of the external surface area to the building's volume. The compactness of the building and its orientation in relation to the cardinal directions affect not only heat loss, but also solar gains [9]. The climatic location, including differences between north-eastern and

od 2030 r. wszystkie nowe budynki w UE powinny być bezemisyjne, co oznacza konieczność zastosowania zaawansowanych technologii budowlanych i zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii [1]. Jednym z najistotniejszych czynników wpływających na charakterystykę energetyczną budynków jest izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych, której optymalizacja może znacznie ograniczyć straty ciepła oraz koszty eksploatacyjne [2, 3]. W literaturze analizuje się różne podejście do doboru grubości izolacji termicznej. Metody bazujące na analizie ekonomicznej, takie jak optymalizacja z wykorzystaniem wartości bieżącej netto (NPV), pozwalają na uwzględnienie kosztów inwestycyjnych, oszczędności energii oraz okresu zwrotu nakładów [4 – 7]. Jednocześnie prowadzone są analizy wykorzystujące rzeczywiste dane eksploatacyjne z obiektów istniejących, co pozwala na uwzględnienie kontekstu lokalnego oraz specyfiki użytkowania budynku [8]. Równie ważnym czynnikiem wpływającym na efektywność energetyczną budynków jest geometria bryły, opisana wskaźnikiem kształtu budynku A/V, który określa stosunek powierzchni przegród zewnętrznych do kubatury. Zwartość bryły oraz orientacja względem stron świata mają wpływ nie tylko na straty ciepła, ale także na zyski słoneczne [9]. Lokalizacja klimatyczna, w tym różnice pomiędzy strefami północno-wschodniej i zachodniej Polski, również przekładają się na zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia [10].

¹⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Architektury i Urbanistyki

²⁾ Dolnośląska Agencja Energii i Środowiska

³⁾ Uniwersytet Białostocki, Instytut Budownictwa

⁴⁾ Uniwersytet Zielonogórski, Instytut Inżynierii Środowiska

*) Correspondence address: a.alsabry@wp.pl

western zones in Poland, translates into energy demand for heating and cooling [10].

The article compares two methods of determining the optimal thickness of external wall insulation. One method is based on economic analysis, while the other uses data from two residential buildings with different geometries and in different climatic conditions.

Methodology

The study analysed two types of multi-family residential building in two different locations: Białystok and Zielona Góra. Table 1 presents detailed data characterising the analysed buildings. The effectiveness and accuracy of two methods for determining the optimal thickness of thermal insulation for external walls in multi-family buildings were assessed. The first calculation method uses the NPV (*net present value*) indicator, while the second involves modelling buildings equipped with heating and cooling systems. The external walls of the analysed buildings were made of sand-lime blocks and insulated with polystyrene foam boards. The flat roof was made of 20 cm thick reinforced concrete with mineral wool boards for thermal insulation. The ceiling above the unheated basement was made of 20 cm-thick reinforced concrete and insulated with mineral wool. The buildings were designed with aluminium profile windows with triple glazing and glazed aluminium exterior doors. A visualisation of the buildings is shown in Figure 1.

Table 1. Data on the surface area and volume of the analysed buildings

Tabela 1. Dane dotyczące powierzchni i kubatury analizowanych budynków

Building type/ Typ budynku	Area of temperature-controlled rooms [m ²]/Powierzchnia pomieszczeń o regulowanej temperaturze [m ²]	Number of apartments/ Liczba mieszkań	Area of the building envelope A [m ²]/Po- wierzchnia obudowy budynku A [m ²]	External volume of the building V [m ³]/ Kubatura budynku V [m ³]	Building compactness A/V [1/m]/Współczynnik kształtu budynku A/V[1/m]
1 (B1)	844,28	12	1297,00	3027,00	0,43
2 (B2)	1610,28	42	2659,92	10594,50	0,25

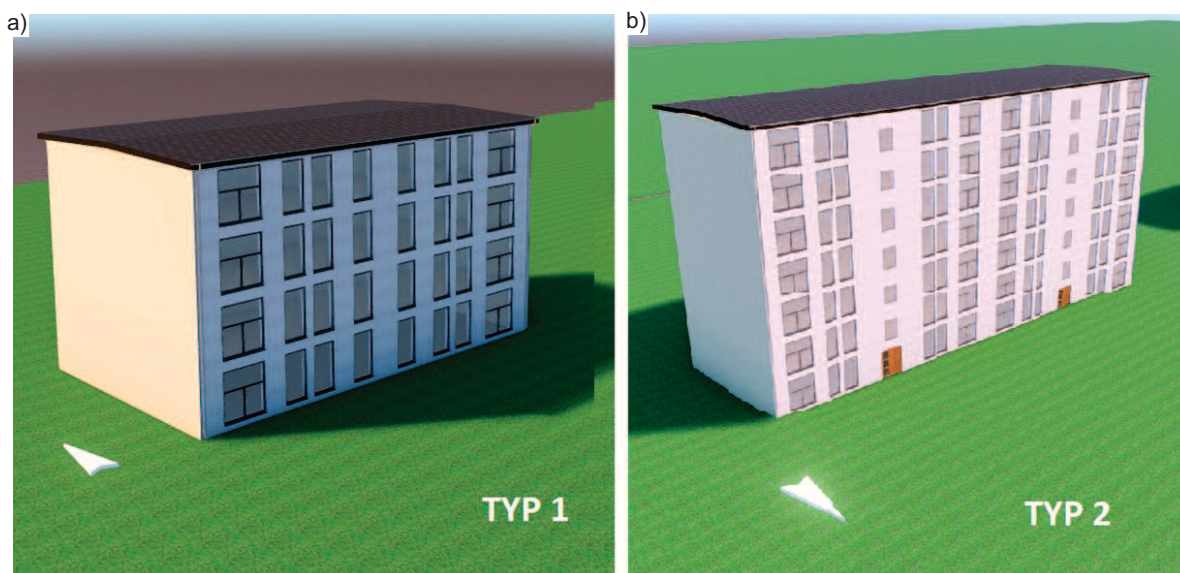


Fig. 1. Type 1 (a) and Type 2 (b) building models

Rys. 1. Modele budynków typu 1 (a) i typu 2 (b)

W artykule porównano dwie metody wyznaczania optymalnej grubości izolacji ścian zewnętrznych: bazującą na analizie ekonomicznej oraz wykorzystującą dane z rzeczywistych dwóch budynków mieszkalnych o różnej geometrii, zlokalizowanych w odmiennych warunkach klimatycznych.

Metody badań

W ramach badań przeprowadzono analizy dwóch typów wielorodzinnych budynków mieszkalnych, usytuowanych w dwóch różnych lokalizacjach (Białystok, Zielona Góra). Szczegółowe dane charakteryzujące analizowane obiekty zawarto w tabeli 1. Przeprowadzono ocenę skuteczności i trafności dwóch metod wyznaczania optymalnej grubości izolacji termicznej ścian zewnętrznych w budynkach wielorodzinnych. Pierwsza metoda obliczeniowa wykorzystuje wskaźnik NPV (*net present value*), a druga polega na modelowaniu budynków wyposażonych w systemy grzewcze oraz systemy chłodzenia. Ściany zewnętrzne analizowanych budynków wykonano z bloczków wapienno-piaskowych, które ocieplono płytami styropianowymi. Stropodach zaprojektowano jako żelbetowy, o grubości 20 cm, z izolacją termiczną z płyt z wełny mineralnej. Strop nad nieogrzewaną piwnicą również wykonano z żelbetu o grubości 20 cm i zaizolowano wełną mineralną. W budynkach przewidziano okna o profilach aluminiowych z pakietem trzyszybowym oraz przeszklone drzwi zewnętrzne wykonane z aluminium. Wizualizację obiektów przedstawiono na rysunku 1.

The optimal thermal insulation values for external walls were determined based on technical, environmental and economic analyses. Table 2 presents detailed information on the U-values for external partitions.

Gravity ventilation was factored into the analysis of the buildings. The energy analyses took into account the internal temperature to ensure thermal comfort for users in both winter and summer. The calculated internal temperature values for heated and cooled rooms were adopted in accordance with their intended use and the requirements set out in Technical Conditions [10]. The buildings were designed with underfloor water heating and a central pump with central and local control. The heat source will be air-water heat pumps with a seasonal coefficient of performance (SCOP) of 3.0, and cooling will be based on a variable refrigerant flow (VRF) system. In the studies conducted, it was assumed that the technical systems would be powered by the power grid and a photovoltaic installation.

The optimal thickness of thermal insulation is determined based on the NPV index. The first analysed method is based on the net present value (NPV) economic indicator, which currently forms the basis of the methodology for optimising insulation thickness in Poland. It assumes that the optimal thermal insulation thickness corresponds to the maximum NPV value. The analysis takes into account only the investment costs and the resulting energy demand reduction savings during the building's operational life. The NPV value is determined from the following relationship [11]:

$$NPV = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta E_i \cdot \frac{(1+s)^i}{(1+r)^i} - I_0 \text{ [zł]} \quad (1)$$

where:

ΔE_i – energy savings per year (GJ), resulting from the use of an additional layer of insulation;

s – annual rate of increase in energy prices above inflation;

r – annual discount rate;

I_0 – investment cost (cost of purchase and installation of additional thermal insulation)

The reduction in energy costs is calculated using the following formula [11]:

$$\Delta E_i = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta U \cdot SD \cdot \frac{1}{\eta_{H,g}} \cdot c_{en} \text{ [zł/(m}^2 \cdot \text{year)]} \quad (2)$$

where:

ΔU – change in the value of the heat transfer coefficient U of the partition [W/(m²·K)];

SD – number of degree-days [K·day];

$\eta_{H,g}$ – heat source efficiency;

c_{en} – price of heat [zł/GJ].

An economic analysis was carried out over a 20-year operating period. A real discount rate of 2.5% per annum was used, and an increase in energy prices of 0.5% above inflation

Table 2. The values of the heat transfer coefficient (U) for the selected external partitions are limited according to the W. T. regulations [10]

Tabela 2. Wartości graniczne współczynnika przenikania ciepła U wybranych przegród zewnętrznych wg rozporządzenia W. T. [10]

Partition type/ Typ elementu	Heat transfer coefficient U [W/(m ² ·K)]/ Współczynnik przenikania ciepła U [W/(m ² ·K)]
Exterior walls/ Ściany zewnętrzne	0,20
Flat roof/Dach płaski	0,15
Ceiling above the garage/ Strop nad garażem	0,25
Window/Okno	0,90
Exterior doors/ Drzwi zewnętrzne	1,30

Wartości optymalnej izolacyjności termicznej ścian zewnętrznych wyznaczono na podstawie analiz technicznych, środowiskowych oraz ekonomicznych. Szczegółowe informacje o współczynnikach przenikania ciepła U przegród zewnętrznych przedstawiono w tabeli 2.

W analizowanych budynkach przewidziano wentylację grawitacyjną. W przeprowadzonych analizach energetycznych uwzględniono temperaturę wewnętrzną zapewniającą komfort cieplny użytkowników zarówno w okresie zimowym, jak i letnim. Obliczeniowe wartości temperatury wewnętrznej w pomieszczeniach ogrzewanych i chłodzonych przyjęto zgodnie z ich funkcją użytkową, na podstawie wymagań zawartych w WT [10]. W budynkach zaprojektowano wodne ogrzewanie podłogowe, pompę ciepłą z regulacją centralną oraz miejscową. Źródłem ciepła będą pompy ciepła powietrze-woda o SCOP = 3,0, a chłodzenie oparte na systemie ze zmiennym przepływem czynnika chłodniczego VRF. W przeprowadzonych badaniach założono, że systemy techniczne zasilane będą z sieci elektroenergetycznej oraz instalacji fotowoltaicznej.

Wyznaczenie optymalnej grubości izolacji termicznej na podstawie wskaźnika NPV. Pierwsza z analizowanych metod bazuje na wskaźniku ekonomicznym NPV, który stanowi obecnie podstawę obowiązującej w Polsce metody optymalizacji grubości warstwy izolacyjnej. Zakłada ona, że optymalna grubość termoizolacji odpowiada wartości maksymalnego NPV, przy czym w analizie uwzględnia się wyłącznie nakłady inwestycyjne oraz oszczędności wynikające z ograniczenia zapotrzebowania na energię do ogrzewania budynku podczas jego eksploatacji. Wartość NPV wyznacza się z zależności [11]:

$$NPV = \sum_{i=1}^{i=n} \Delta E_i \cdot \frac{(1+s)^i}{(1+r)^i} - I_0 \text{ [zł]} \quad (1)$$

gdzie:

ΔE_i – oszczędność energii w roku (GJ), wynikająca z zastosowania dodatkowej warstwy izolacji;

s – roczny wskaźnik wzrostu cen energii ponad inflację;

r – roczna stopa dyskontowa;

I_0 – koszt inwestycji (koszt zakupu i montażu dodatkowej izolacji termicznej).

Zmniejszenie kosztów energii oblicza się natomiast wg wzoru [11]:

$$\Delta E_i = 8,64 \cdot 10^{-5} \cdot \Delta U \cdot SD \cdot \frac{1}{\eta_{H,g}} \cdot c_{en} \text{ [zł/(m}^2 \cdot \text{rok)]} \quad (2)$$

gdzie:

ΔU – zmiana wartości współczynnika przenikania ciepła U przegrody [W/(m²·K)];

SD – liczba stopniodni [K·dzień];

$\eta_{H,g}$ – sprawność źródła ciepła;

c_{en} – cena energii cieplnej [zł/GJ].

Przeprowadzono analizę ekonomiczną w przypadku 20-letniego okresu eksploatacji, stosując realną stopę dyskontową 2,5% rocznie i uwzględniając wzrost cen energii o $s = 0,5\%$ powyżej inflacji. Koszt energii elektrycznej: 1,53 zł/kWh.

was taken into account. Electricity cost: PLN 1.53/kWh. EPS polystyrene foam ($\lambda = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) with a thickness ranging from 1 to 50 cm was used. Material cost: PLN 320/ m^3 , with additional costs including labour and scaffolding. PLN 310/ m^2 . The simulations concerned Zielona Góra (mild climate) and Białystok (cooler climate). The number of degree days was calculated based on a standard heating season and an internal temperature of 20°C .

Determination of optimal thickness of thermal insulation for economic and environmental reasons using real building calculation models. The study compared the method of optimising insulation thickness based on the NPV index with a balance analysis, taking into account the actual parameters of buildings, variable climatic conditions (in Białystok and Zielona Góra) and cooling demand (a key consideration in the context of climate change). Simulations were performed for different insulation thicknesses using meteorological data and specialised software for preparing energy performance certificates for buildings, as well as for calculating heat demand and optimising installations (Certo, 2015). For each configuration, the following were calculated: utility energy demand for heating (EU_H), utility energy demand for cooling (EU_C), primary energy demand (EP), carbon dioxide emissions (CO_2), NPV related to 1 m^2 of temperature-controlled building area (heated and cooled). Unlike the traditional net present value (NPV) approach, which considers only heating costs, the new method analyses the combined energy, economic and environmental effects, taking into account CO_2 emissions (0.597 kg/kWh for electricity and 0 kg/kWh for solar energy). The results suggest that the traditional NPV methodology needs to be updated in light of the increasing risk of overheating in buildings and climate goals.

Results and analysis

The aim of the analysis was to determine the optimal thickness of external wall insulation for two locations: Zielona Góra and Białystok, based on the net present value (NPV) expressed in PLN/ m^2 of wall surface area. The calculations concerned insulation thicknesses of 0 – 50 cm, taking into account the corresponding heat transfer coefficient U values. According to the regulations in force in Poland, the U value of walls cannot exceed $0.20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. In the case of Zielona Góra, the highest NPV reaches PLN 958.16/ m^2 with an insulation thickness of 25 cm and $U = 0.12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, and in Białystok PLN 1092.68/ m^2 with a thickness of 27 cm and $U = 0.11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. In both cases, the U values are lower than those permitted by regulations, which confirms compliance with technical requirements. The thicker optimal insulation in Białystok results from the lower average monthly outdoor air temperature and higher heat energy demand. The results obtained indicate that the economically optimal insulation thickness exceeds the minimum required by regulations, which argues for the use of better thermal protection of external partitions. The results of the analyses are presented in Figure 2.

An analysis of the annual energy demand for heating and cooling in two types of building in Zielona Góra and Białystok determined the optimal U -value for heat transfer, with a

W obliczeniach wykorzystano styropian EPS ($\lambda = 0.031 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$) grubości 1 ÷ 50 cm. Koszt materiału: 320 zł/ m^3 , pozostałe koszty (robocizna, rusztowania): 310 zł/ m^2 . Symulacje dotyczyły Zielonej Góry (łagodny klimat) i Białegostoku (chłodniejszy). Obliczono liczbę stopniogrzewczych i temperatury wewnętrznej 20°C .

Wyznaczenie optymalnej grubości izolacji termicznej z wykorzystaniem rzeczywistych modeli obliczeniowych budynków. W badaniach porównano metodę optymalizacji grubości izolacji bazującą na wskaźniku NPV z analizą bilansową, uwzględniającą rzeczywiste parametry budynków, zmienne warunki klimatyczne (Białystok, Zielona Góra) oraz zapotrzebowanie na chłodzenie (kluczowe ze względu na zmianę klimatu). Symulacje wykonano dla różnej grubości izolacji, wykorzystując dane meteorologiczne i specjalistyczne oprogramowanie służące do sporządzania świadectw charakterystyki energetycznej budynków oraz do obliczeń zapotrzebowania na ciepło i optymalizacji instalacji (Certo 2015). W przypadku każdej konfiguracji obliczono: zapotrzebowanie na energię użytkową do ogrzewania (EU_H); zapotrzebowanie na energię użytkową do chłodzenia (EU_C); zapotrzebowanie na energię pierwotną (EP); emisję dwutlenku węgla (CO_2); wartość wskaźnika NPV odniesioną do 1 m^2 powierzchni budynku o regulowanej temperaturze (ogrzewanej i chłodzonej). W odróżnieniu od klasycznego NPV (tylko koszty ogrzewania), nowe podejście analizuje łączne efekty energetyczne, ekonomiczne i środowiskowe (uwzględniając emisję CO_2 : 0,597 kg/kWh w przypadku energii elektrycznej i 0 energii słonecznej). Wyniki wskazują na konieczność aktualizacji klasycznej metody NPV w kontekście zwiększającego się ryzyka przegrzewania budynków i celów klimatycznych.

Wyniki i ich analiza

Celem analizy było wyznaczenie optymalnej grubości izolacji ścian zewnętrznych budynków: w Zielonej Górze i Białymstoku, na podstawie wartości bieżącej netto (NPV) wyrażonej w zł/ m^2 powierzchni ściany. Obliczenia dotyczyły grubości izolacji 0 – 50 cm, uwzględniając odpowiadające im wartości współczynnika przenikania ciepła U . Zgodnie z obowiązującymi w Polsce przepisami, U ścian nie może przekraczać $0,20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. W przypadku Zielonej Góry największe NPV wynosi 958,16 zł/ m^2 przy grubości izolacji 25 cm i $U = 0,12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, a w Białymstoku 1092,68 zł/ m^2 przy grubości 27 cm i $U = 0,11 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$. W obu przypadkach wartości U są mniejsze niż dopuszczalne przepisami, co potwierdza zgodność z wymaganiami technicznymi. Grubsza optymalna izolacja w Białymstoku wynika z niższej średniej miesięcznej temperatury powietrza zewnętrznego i większego zapotrzebowania na energię ciepłą. Otrzymane wyniki wskazują, że optymalna ekonomicznie grubość izolacji przekracza minimum wymagane przepisami, co przemawia za stosowaniem lepszej ochrony cieplnej przegród zewnętrznych. Wyniki analizy przedstawiono na rysunku 2.

Na podstawie analizy rocznego zapotrzebowania na energię do ogrzewania i chłodzenia dwóch typów budynków (w Zielonej Górze i Białymstoku), ustalono optymalne wartości współczynnika przenikania ciepła U , przy maksymalnym dopusz-

maximum permissible U-value of $0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$. The lowest heating energy demand was achieved at $U = 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$, confirming that greater insulation thickness reduces heat loss in winter. For cooling purposes, $U = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$ was found to be most advantageous, as greater insulation increases the cooling demand in summer.

The optimal insulation thickness to minimise the total energy demand for heating and cooling is 30 cm ($U = 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$) and 14 cm ($U = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$) for cooling alone.

The shape of the building affects efficiency; a compact building structure guarantees a low A/V shape factor.

The results show that, in regions with higher average monthly outdoor air temperatures, moderate insulation is preferable to avoid overheating in summer. In colder regions, however, maximum insulation is preferable, as cooling needs are low. Details are shown in Figures 3 and 4.

The analysis examined the impact of insulation thickness d on the net present value (NPV) in order to determine the economically optimal thickness of the insulation layer. Calculations were performed for insulation thicknesses ranging from 0 to 30 cm, over a 20-year period, with a fixed discount rate. For building B1 in Zielona Góra, the maximum NPV was PLN 54.03 per m^2 of temperature-controlled space (for heating and cooling purposes), which was achieved at an insulation

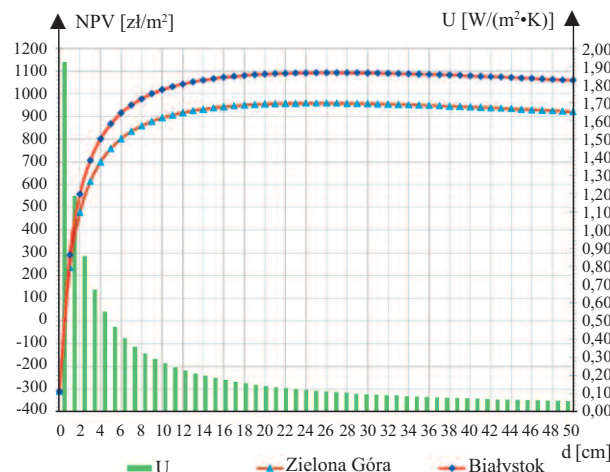


Fig. 2. Dependence of Net Present Value (NPV) on thermal insulation thickness

Rys. 2. Zależność wartości NPV od grubości izolacji termicznej

czalnym $U \leq 0.2 \text{ W/m}^2\text{K}$. Najmniejsze zapotrzebowanie na energię do ogrzewania uzyskano przy $U = 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$, co potwierdza, że większa grubość izolacji zmniejsza straty ciepła zimą. W przypadku chłodzenia najkorzystniejsze okazało się $U = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$, ponieważ wyższa izolacyjność zwiększa zapotrzebowanie na chłodzenie latem.

Optymalna grubość izolacji, minimalizująca łączne zapotrzebowanie na energię do ogrzewania i chłodzenia, to 30 cm ($U = 0.10 \text{ W/m}^2\text{K}$), a w przypadku samego chłodzenia – 14 cm ($U = 0.20 \text{ W/m}^2\text{K}$). Kształt budynku wpływa na efektywność

energetyczną: zwarta bryła budynku gwarantuje uzyskanie niskiej wartości wskaźnika kształtu A/V.

Wyniki pokazują, że w regionach o wyższej średniej miesięcznej temperaturze powietrza zewnętrznego lepsza jest umiarkowana izolacja, aby uniknąć przegrzewania latem, natomiast w regionach chłodniejszych – maksymalna izolacja, gdyż potrzeby chłodzenia są tam niewielkie. Szczegóły przedstawiono na rysunkach 3 i 4.

W ramach analizy zbadano wpływ grubości izolacji termicznej d na wartość bieżącą netto NPV, w celu określenia ekonomicznie optymalnej grubości warstwy izolacyjnej. Obliczenia wykonano przy grubości izolacji 0–30 cm, przy dwudziestoletnim okresie analizy i założonej stałej stopie dyskontowej. W przypadku budynku B1 w Zielonej Górze maksymalna wartość NPV wyniosła 54,03 zł/ m^2 powierzchni o re-

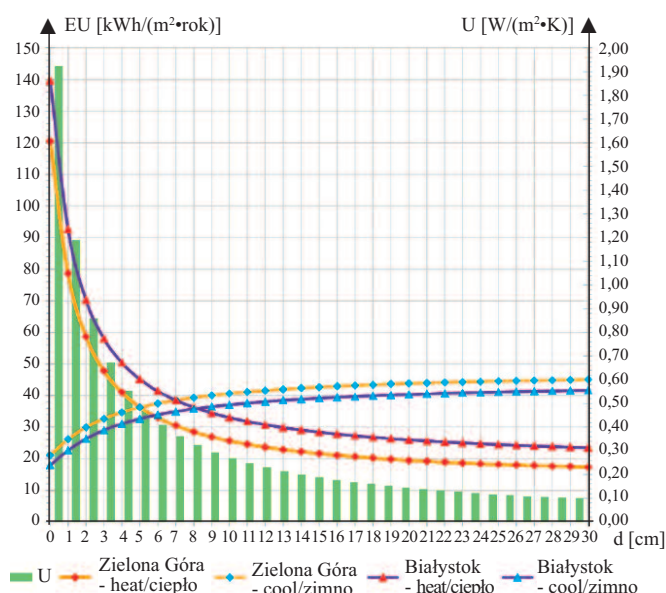


Fig. 3. Dependence of annual utility energy demand on thermal insulation thickness for a Type 1 building

Rys. 3. Zależność rocznego zapotrzebowania na energię użytkową od grubości izolacji termicznej w budynku typu 1

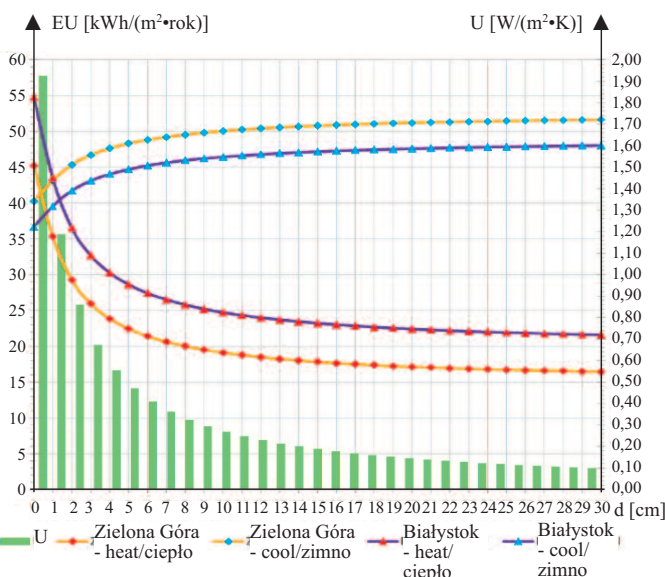


Fig. 4. Dependence of annual utility energy demand on thermal insulation thickness for a Type 2 building

Rys. 4. Roczne zapotrzebowanie na energię użytkową w zależności od grubości izolacji termicznej w budynku typu 2

thickness of 19 cm. For building B2 in the same location, the optimal insulation thickness was found to be 16 cm, with a corresponding NPV of PLN 9.48/m². These results reflect the moderate economic benefits of insulation in a region with a milder climate. In Białystok, however, where the heating season is longer, the economic benefits of insulation are significantly higher. In building B1, the maximum NPV was as high as PLN 65.86/m² with an insulation thickness of 20 cm. In building B2, the NPV reached a maximum of PLN 13.42/m² with a thermal insulation thickness of 19 cm. Detailed calculation results are presented in Figures 5 and 6.

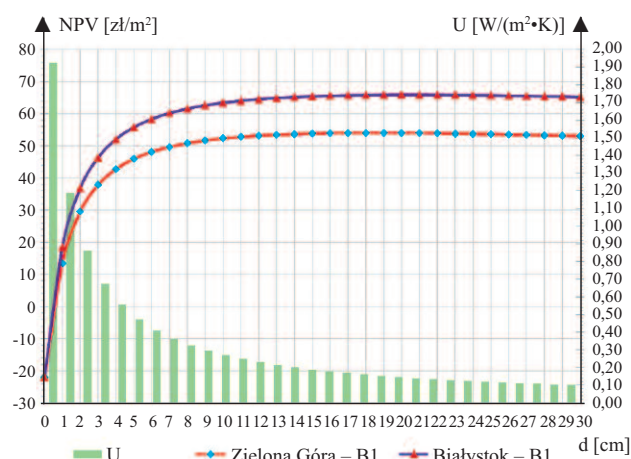


Fig. 5. NPV values in PLN/m² of temperature-controlled space (heating and cooling) as a function of thermal insulation thickness for a Type 1 building

Rys. 5. Wartości NPV [zł/m²] powierzchni o regulowanej temperaturze (ogrzewanie i chłodzenie) w zależności od grubości izolacji termicznej w przypadku budynku typu 1

Assuming EP minimisation, the optimal thermal insulation thickness is 30 cm for all analysed variants. This indicates the validity of using a thicker insulation layer in terms of energy efficiency (see Figure 7). However, it should be emphasised that this value exceeds the economically optimal level (the maximum net present value (NPV) was achieved at a thickness of 16 – 20 cm), indicating the need to consider multi-criteria optimisation in the design to cover both energy and economic aspects.

As expected, all analysed variants showed a clear tendency to reduce CO₂ emissions as the insulation layer thickness increased. As expected, the lowest emissions, corresponding to minimum primary energy consumption, occurred with the maximum insulation thickness considered (30 cm; see Figure 8). It should be emphasised that, while an increase in insulation thickness always results in a reduction in emissions, these reductions decrease exponentially. In other words, the reduction effect of each additional centimetre of insulation is smaller and smaller. This means that, in design practice, a compromise between material costs and environmental benefits should be considered, particularly given the carbon footprint of insulation material production.

gulowanej temperaturze (ogrzewanie i chłodzenie), osiągając maksimum przy grubości izolacji 19 cm. W przypadku budynku B2 w tej samej lokalizacji, optymalna grubość izolacji wyniosła 16 cm, a odpowiadająca jej wartość NPV to 9,48 zł/m². Wyniki te odzwierciedlają umiarkowane korzyści ekonomiczne w regionie o łagodnym klimacie. Z kolei w Białymstoku, gdzie sezon grzewczy jest dłuższy niż w Zielonej Górze, korzyści ekonomiczne wynikające z izolacji są wyraźnie większe. W budynku B1 wartość maksymalna NPV wyniosła aż 65,86 zł/m², przy grubości izolacji 20 cm, natomiast w budynku B2, NPV osiąga maksimum 13,42 zł/m² przy grubości izolacji termicznej 19 cm. Szczegółowe wyniki obliczeń przedstawiono na rysunkach 5 i 6.

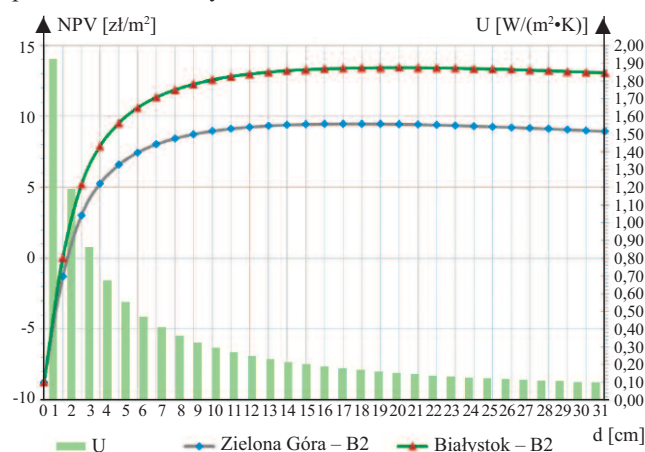


Fig. 6. NPV values in PLN/m² of temperature-controlled space (heating and cooling) as a function of thermal insulation thickness for a Type 2 building

Rys. 6. Wartości NPV [zł/m²] powierzchni o regulowanej temperaturze (ogrzewanie i chłodzenie) w zależności od grubości izolacji termicznej w przypadku budynku typu 2

Przy założeniu minimalizacji EP, optymalna grubość izolacji termicznej wynosi 30 cm w przypadku wszystkich analizowanych wariantów. Wskazuje to na zasadność stosowania grubszej warstwy izolacyjnej z punktu widzenia efektywności energetycznej (rysunek 7). Należy jednak podkreślić, że taka wartość przekracza poziom optymalny ekonomicznie (maksymalne NPV przypadało przy grubości 16 – 20 cm), co świadczy o potrzebie uwzględniania w projektowaniu wielokryterialnej optymalizacji, obejmującej zarówno aspekty energetyczne, jak i ekonomiczne.

Wszystkie analizowane warianty wykazały wyraźne tendencje zmniejszenia emisji CO₂ wraz ze zwiększaniem grubości warstwy izolacji. Jak się spodziewano, najmniejsza emisja – odpowiadająca minimalnemu zużyciu energii pierwotnej – wystąpiła w przypadku maksymalnej rozpatrywanej grubości izolacji, tj. 30 cm (rysunek 8). Należy podkreślić, że choć wzrost grubości izolacji zawsze skutkuje redukcją emisji, to przyrosty te maleją wykładniczo. Innymi słowy, każdy kolejny centymetr izolacji przynosi coraz mniejszy efekt redukcyjny. Oznacza to, że w praktyce projektowej należy rozważyć kompromis pomiędzy kosztami materiałowymi a zyskami środowiskowymi, szczególnie w kontekście śladu węglowego podczas produkcji materiałów izolacyjnych.

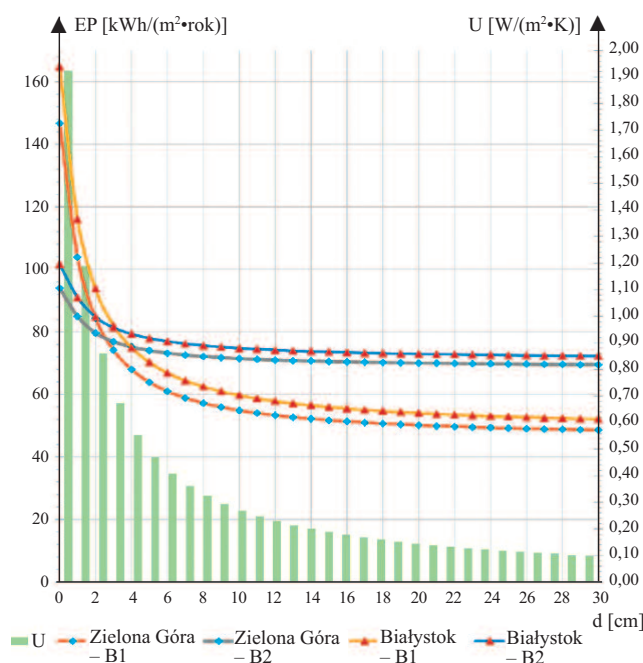


Fig. 7. Dependence of annual non-renewable primary energy demand EP [kWh/(m²·yr)] on the thickness of thermal insulation
 Rys. 7. Roczne zapotrzebowanie na nieodnawialną energię pierwotną EP [kWh/(m²·rok)] w zależności od grubości izolacji termicznej

Summary

The NPV-based method determines the optimal insulation thickness solely from the perspectives of investment costs and energy savings resulting from the reduction in heating energy demand. However, it does not fully consider other important factors, such as climate change, the need to cool buildings in summer and CO₂ emissions, all of which are crucial in the context of sustainable development. A more accurate method based on computer simulations takes into account actual building usage conditions and specific climatic conditions. This enables environmental and energy aspects to be considered, including cooling demand, CO₂ emissions and the impact of climate change.

The article presents key factors affecting the energy efficiency of multi-family buildings, such as:

- the thermal insulation of external partitions, where the thickness and quality of the insulation in walls, roofs and ceilings determines the amount of heat lost in winter and gained in summer; increasing insulation thickness reduces energy loss, but can lead to overheating in summer, especially in the warmer regions of Poland;
- the geometry and compactness of the building significantly affect energy demand: buildings with a higher A/V ratio have greater heat loss, whereas a compact building helps reduce energy losses;
- climate location, i.e. climatic conditions such as the length of the heating season and the average outdoor temperature, determines the optimal insulation thickness and heating and cooling requirements; in colder regions, higher levels of insulation are preferable to reduce the risk of overheating, whereas in warmer regions, moderate insulation is preferable;

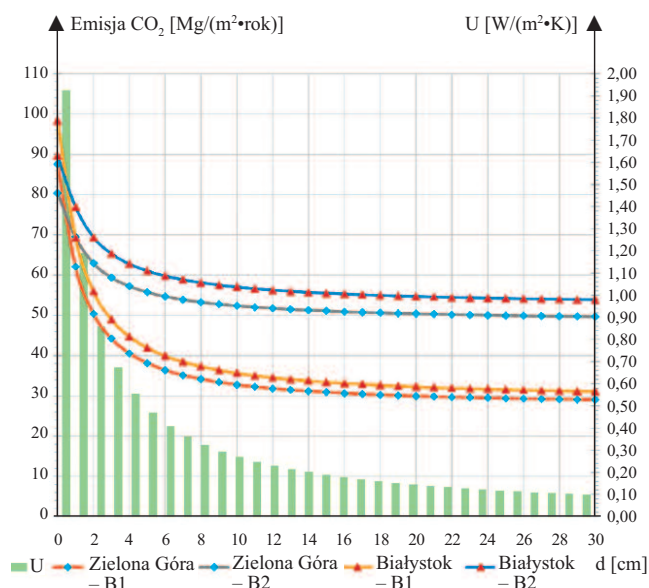


Fig. 8. Relationship of annual CO₂ emissions [Mg/(m²·yr)] depending on the thickness of thermal insulation
 Rys. 8. Zależność rocznej emisji CO₂ [Mg/(m²·rok)] w zależności od grubości izolacji termicznej

Podsumowanie

Metoda bazująca na wskaźniku NPV pozwala określić optymalną grubość izolacji wyłącznie z perspektywy kosztów inwestycyjnych i oszczędności energetycznych, wynikających z redukcji zapotrzebowania na energię grzewczą. Nie uwzględnia w pełni innych istotnych aspektów, takich jak zmiany klimatyczne, konieczność chłodzenia budynków w okresie letnim oraz emisja CO₂, co staje się kluczowe w kontekście zrównoważonego rozwoju. Z kolei dokładniejsza metoda, bazująca na symulacjach komputerowych, uwzględnia rzeczywiste warunki użytkowania budynków oraz specyficzne warunki klimatyczne. Umożliwia to uwzględnienie aspektów środowiskowych i energetycznych oraz obejmuje m.in. zapotrzebowanie na chłodzenie, emisję CO₂ oraz wpływ zmian klimatycznych.

W artykule zaprezentowano kluczowe czynniki wpływające na efektywność energetyczną budynków wielorodzinnych, takie jak:

- izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych, gdzie grubość i jakość izolacji ścian, dachów oraz stropów decyduje o wielkości strat ciepła zimą i zysków ciepłych latem; zwiększenie grubości izolacji zmniejsza straty energii, ale może prowadzić do przegrzewania latem, szczególnie w cieplejszych regionach Polski;
- geometria i zwartość bryły budynku, czyli stosunek powierzchni przegród zewnętrznych do kubatury ogrzewanej (A/V) istotnie wpływają na zapotrzebowanie na energię; budynki o większym wskaźniku A/V mają większe straty ciepła, natomiast zwarta bryła sprzyja ograniczeniu strat energetycznych;
- warunki klimatyczne, takie jak długość sezonu grzewczego i średnia temperatura zewnętrzna, determinują optymalną grubość izolacji oraz potrzeby grzewcze i chłodnicze; w chłodniejszych regionach korzystniejsza jest większa izolacyjność, natomiast w cieplejszych – umiarkowana, aby ograniczyć ryzyko przegrzewania;

- the choice of heating, cooling and ventilation systems (e.g. heat pumps, gravity ventilation and photovoltaics) affects energy consumption and CO₂ emission; with renewable energy sources reducing a building's carbon footprint;

- method for determining optimal insulation – methods based on economic analysis (NPV) take into account investment and operating costs, but do not always consider climate change and cooling needs; more accurate results are obtained using a method based on actual energy models of buildings, which takes into account both economic and environmental aspects (CO₂ emissions) and variable conditions of use;

- increasing insulation thickness leads to a reduction in CO₂ emissions, but these increases decrease exponentially with each additional centimeter of insulation; design should take into account the trade-off between material costs and environmental benefits.

- an individual design approach and optimization of energy efficiency requires consideration of local climatic conditions, the specific characteristics of the building, and actual conditions of use.

The results of the analyses can inform the optimisation of investments in new projects and the thermal modernisation of existing buildings.

The energy efficiency of multi-family buildings is influenced by a variety of technical, economic, environmental and local factors. A multi-criteria approach that takes actual energy models into account is the most effective way to optimise energy consumption, costs, and CO₂ emissions.

- wybór systemów grzewczych, chłodniczych oraz wentylacyjnych (np. pompy ciepła, wentylacja grawitacyjna, fotowoltaika) wpływa na zużycie energii i emisję CO₂; odnawialne źródła energii pozwalają na redukcję śladu węglowego budynku;

- metoda wyznaczania optymalnej izolacji – metoda oparta na bazie analizy ekonomicznej (NPV) uwzględnia koszty inwestycyjne i eksploatacyjne, ale nie zawsze bierze pod uwagę zmiany klimatyczne i potrzeby chłodzenia; dokładniejsze wyniki daje metoda bazująca na rzeczywistych modelach energetycznych budynków, uwzględnia aspekty ekonomiczne, środowiskowe (emisję CO₂) i zmienne warunki użytkowania;

- zwiększenie grubości izolacji prowadzi do redukcji emisji CO₂, ale przyrosty te maleją wykładniczo wraz z kolejnymi centymetrami izolacji; w projektowaniu należy uwzględnić kompromis między kosztami materiałowymi a korzyściami środowiskowymi;

- indywidualne podejście projektowe i optymalizacja efektywności energetycznej wymagają uwzględnienia lokalnych uwarunkowań klimatycznych, specyfiki budynku oraz rzeczywistych warunków użytkowania.

Wyniki analiz mogą stanowić podstawę do optymalizacji inwestycji zarówno w przypadku nowych projektów, jak i podczas termomodernizacji istniejących budynków. Efektywność energetyczna budynków wielorodzinnych jest kształtowana przez złożoną kombinację czynników technicznych, ekonomicznych, środowiskowych oraz lokalnych. Najlepsze rezultaty daje podejście wielokryterialne uwzględniające rzeczywiste modele energetyczne, które pozwala na optymalizację zużycia energii, kosztów oraz emisji CO₂.

Received: 17.04.2025

Revised: 09.06.2025

Published: 19.09.2025

Artykuł wpłynął do redakcji: 17.04.2025 r.

Otrzymano poprawiony po recenzjach: 09.06.2025 r.

Opublikowano: 19.09.2025 r.

Literature

[1] European Commission. Proposal for a directive of the European Parliament and of the Council on the energy performance of buildings (recast). Brussel, 2021. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52021PC0802>.

[2] Ozel M. Effect of wall orientation on the optimum insulation thickness by using a dynamic method. *Applied Energy*. 2011; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.01.049>.

[3] Al-Homoud M. Performance characteristics and practical applications of common building thermal insulation materials. *Building and Environment*. 2005; <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2004.05.013>.

[4] Kurekci NA. Determination of optimum insulation thickness for building walls by using heating and cooling degree-day values of all Turkey's provincial centers. *Energy and Buildings*. 2016; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2016.03.004>.

[5] Özturan MK, Seyhan AK. Determination of optimum insulation thickness of building walls according to four main directions by accounting for solar radiation: A case study of Erzincan, Türkiye. *Energy and Buildings*. 2024; <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2023.113871>.

[6] Axaopoulos PJ, Sakellariou EI, Panayiotou G. P, Kalogirou S. Evaluation of the optimum insulation thickness of building external walls and roof based on human thermal comfort criterion. *Renewable Energy*. 2025; <https://doi.org/10.1016/j.renene.2025.123058>.

[7] Axaopoulos I, Axaopoulos P, Gelegenis J. Optimum insulation thickness for external walls on different orientations considering the speed and direction of the wind. *Applied Energy*. 2014; <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.008>.

[8] Baglivo C, Congedo PM, Zacà I. Cost-optimal analysis and technical comparison between standard and high efficient mono-residential buildings in a warm climate. *Energy*. 2015; <https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.02.062>.

[9] Stazi F, Mastrucci A, Munafò P. Life cycle assessment approach for the optimization of sustainable building envelopes: An application on solar wall systems. *Building and Environment*. 2012. DOI: 10.1016/j.buildenv.2012.08.003.

[10] Regulation of the Minister of Infrastructure of 12 April 2002 on Technical Conditions, Which Should Correspond to the Buildings and Their Location-Technical Conditions-as Amended. <https://isap.sejm.gov.pl/isap.nsf/download.xsp/WDU20220001225/O/D20221225..>

[11] Pogorzelski JA, Rudczyk-Malijewska E. Optymalna izolacyjność cieplna przegród zewnętrznych. *Materiały Budowlane*. 2004 (377): 44 – 46.